



Evaluación de desempeño de un sistema radiante. Estudio de caso: eNodeB para 3G*

Hernán Paz Penagos^a

Resumen: medir la razón de onda estacionaria de voltaje, las pérdidas de retorno y la distancia a la falla del sistema radiante es una estrategia para evaluar el desempeño de un sistema. Ya sea para verificar la instalación correcta de una nueva estación base o la ampliación de una celda ya existente. Si los valores medidos por el operador no están dentro de los límites establecidos por la agencia reguladora, la antena asociada evidenciará un desempeño bajo por las pérdidas altas de potencia, la eficiencia de potencia baja y una energía reflejada hacia el transmisor. Dicha energía no solamente distorsionará la señal, sino que afectará el nivel de potencia transmitida, el patrón de radiación y, a su vez, el área de cobertura de la estación base.

El objetivo de esta investigación fue analizar los resultados de mediciones de campo de las variables indicadas anteriormente en un sistema radiante eNodeB ubicado en Envigado (Antioquia) para evaluar su desempeño. La metodología que se llevó a cabo fue el análisis de un estudio de caso por sectores y subsectores. Los hallazgos encontrados evidencian un desempeño alto para el sistema radiante de la estación base eNodeB. Lo anterior, se determina mediante razón de onda estacionaria de voltaje de 1,1, pérdidas de retorno de -31,67 y distancia a la falla de 5 m que desarrollan un $|\Gamma|=0,05$, una eficiencia de potencia de 99,8 %. Lo que se encuentra dentro de los rangos límite establecidos por la Agencia Nacional del Espectro.

Palabras clave: desempeño; distancia a la falla; eNodeB; pérdidas de retorno; razón de onda estacionaria de voltaje

Recibido: 16/06/2021

Aceptado: 09/08/2021

Disponible en línea: 31 de diciembre 2021.

Cómo citar: H. Paz Penagos, «Evaluación de desempeño de un sistema radiante: Estudio de caso: eNodeB para 3G», Cien.Ing.Neogranadina, vol. 31, n.º 2, pp. 23-38, dic. 2021.

* Artículo de revisión.

^a Magíster en Teleinformática, PhD. Docente e investigador, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito Bogotá, Colombia. Correo electrónico: hernan.paz@escuelaing.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2692-1989>

Performance Assessment of a Radiant System. Case Study: eNodeB for 3G

Abstract: Measuring the voltage standing wave ratio, return losses, and distance-to-fault of a radiant system is a strategy for assessing its performance, either to verify the correct installation of a new base station or the expansion of an existing cell. If the values measured by the operator are not within limits established by the regulator, the associated antenna will show low performance due to high power losses, low power efficiency, and reflected energy towards the transmitter. This energy will distort the signal and affect the transmitted power level, the radiation pattern, and, in turn, the coverage area of the base station. This research intends to analyze the results of field measurements of the variables above in an eNodeB radiant system located in Envigado (Antioquia) to assess its performance. The method used was the analysis of a case study by sectors and subsectors. The findings show high performance for the radiant system of the eNodeB base station, determined by a voltage standing wave ratio of 1.1, return losses of -31.67, distance-to-fault of 5 m that develops a $|\Gamma| = 0.05$, and power efficiency of 99.8 %, variables within the limit ranges established by the National Spectrum Agency.

Keywords: Performance; distance-to-fault; eNodeB; return losses; voltage standing wave ratio

1. Introducción

Las redes *Long Term Evolution* (LTE) y *LTE Advanced* (LTE-A) se constituyen en la evolución de las redes de tercera generación (3G). Asimismo, se conciben como una infraestructura capaz de soportar servicios multimedia porque ofrecen los recursos necesarios para garantizar la calidad en su entrega [1]. En la estación base se integran todas las funciones de la red de acceso E-UTRAN (especificaciones TS 36.300 y TS 36.401) para los sistemas de radio de telefonía móvil LTE o LTE-A. Tal y como se muestra en la figura 1, una red de acceso E-UTRAN está formada por eNodeBs, o eNBs, que se comunican con el resto de los elementos del sistema mediante tres interfaces: Uu, S1 y X2 [2].

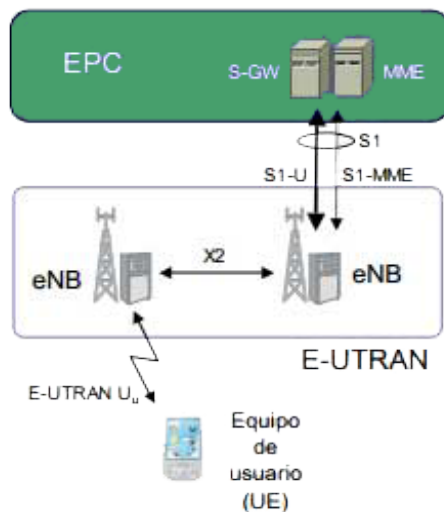


Figura 1. Interconexión del eNodeB con la red y el usuario.

Fuente: elaboración propia.

La interfaz X2 le permite a los eNodeBs conectarse entre sí para intercambiar tanto mensajes de señalización destinados a permitir una gestión más eficiente del uso de los recursos de radio, como tráfico de los usuarios del sistema cuando estos se desplazan de un eNodeB a otro durante un proceso de transferencia de información (*handover*) [3], [4]. La interfaz de radio E-UTRAN Uu da acceso a los usuarios a la eNB [5]. De acuerdo con la ANE (Agencia Nacional del Espectro), esta

interconexión para Colombia y para la tecnología LTE se hace en las bandas 4 de AWS (frecuencias de operación de 1.700 MHz a 2.100 MHz) así:

- Movistar (30 MHz de ancho de banda).
- Avantel (30 MHz de ancho de banda).
- Consorcio ETB-Tigo, por partes iguales (30 MHz de ancho de banda).

Y la banda 7 de 2,5 GHz, para los operadores:

- Claro (30 MHz de ancho de banda).
- DirecTV (70 MHz de ancho de banda).

Una red de acceso E-UTRAN Uu, generalmente, usa antenas tipo panel alargada sectoriales para irradiar y/o capturar ondas electromagnéticas desde el espacio libre [6]. Existen diversos tipos de antenas dependiendo de la banda de frecuencias (GSM, DCS, UMTS) en la que opera la estación base. Estas pueden ser simples, duales (permiten al mismo tiempo los servicios GSM y DCS) o tribanda (permiten al mismo tiempo los servicios GSM, DCS y UMTS). En todos los casos, estas antenas usan el método de diversidad de espacio para obtener una mejor calidad de señal [7]. Las antenas duales utilizan una combinación de diversidad de espacio y diversidad de frecuencia con dos polarizaciones distintas para transmitir y recibir señales moduladas a 850 MHz y 1.900 MHz. Actualmente, las estaciones base para telefonía celular cuentan con varios tipos de configuración múltiple MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) para mejorar la eficiencia espectral del enlace de radio, usando la multicanalización espacial con respecto al sistema de transmisión y recepción única SISO (*Single Input Single Output*) [8].

2. Marco de referencia

Para evaluar el desempeño de un sistema radiante que usa cable coaxial como medio de transmisión se tienen en cuenta la relación de onda estacionaria de voltaje o VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), las pérdidas de retorno o RL (*Return Loss*) y la distancia a la falla o DTF (*Distance To Fault*) [9]. La Agencia Nacional del Espectro (ANE), en su Resolución 449 de 2013, estipula los requisitos siguientes para el servicio móvil terrestre en Colombia:

- El $VSWR$ máximo para estaciones bases digitales existentes debe ser de 1,5:1 (1,5 a 1), con unas pérdidas de retorno máximas de -14 dB.
- El $VSWR$ máximo de entrada en los combinadores debe ser de 1,5:1 y el $VSWR$ máximo de salida de 2:1.
- El $VSWR$ máximo de entrada en los multiacopladores debe ser de 1,5:1.
- El $VSWR$ máximo en las antenas omnidireccionales de al menos 10 dBd debe ser de 1,5:1 (1,5 a 1), con unas pérdidas de retorno máximas de -14 dB.

Los valores $VSWR$, DTF y RL, de los sistemas radiantes (estaciones base), para los operadores celulares en Colombia, se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. $VSWR$ y DTF de los sistemas radiantes (estaciones base) para los operadores celulares en Colombia

Operador / Parámetro	$VSWR$ máximo	DTF máximo (alimentador)	RL (dB)
Claro	1,4	1,1	<-15,6
Tigo	1,5	1,1	<-14
Movistar	1,33	1,05	<-17,69 dB si la antena está a menos 60 m
	1,4	1,05	<-15,56 dB si la antena está a más de 60 m
Avantel	1,3	1,02	<-17,6

Fuente: elaboración propia de acuerdo con información del personal técnico de Claro, Avantel, Movistar y Tigo.

Algunos operadores de telefonía celular exigen los siguientes límites en DTF: 1,02 para el recorrido del cable entre conectores, 1,05 como punto inicio y final (conector inicial y conector final) y 1,2 para una medición en la cual en el extremo final de la línea este la antena.

Los parámetros que se tienen en cuenta en la evaluación de un sistema radiante son la *Relación de onda estacionaria de voltaje*. Esta se define como la relación del voltaje máximo con el voltaje mínimo de una onda estacionaria en una línea de transmisión. Por lo tanto, no tiene unidades. $VSWR$ es un número real y positivo en el rango de ; también es

una función del coeficiente de reflexión (Γ), como se expresa en la ecuación 1.

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (1)$$

Cuanto más pequeño sea el $VSWR$, mejor se acoplará la antena a la línea de transmisión o viceversa. Un $VSWR$ de 1 es una condición de adaptación ideal, pero poco probable dentro de condiciones normales de diseño. Para diseñar un sistema de radiocomunicaciones, un valor de $VSWR$ con relación 1,2:1, o simplemente 1,2, es considerado excelente en la mayoría de los casos [10]. A menudo, las antenas deben cumplir un requisito de ancho de banda dado en términos de $VSWR$. El porcentaje de la potencia reflejada o transmitida es otra manera de expresar $VSWR$ (ver tabla 2). Por ejemplo, un $VSWR$ permitido máximo de 1,2 corresponde a 0,8 % de potencia reflejada y 99,2 % de potencia transmitida.

Tabla 2. $VSWR$ expresado en términos de porcentajes de potencia reflejada y transmitida

$VSWR$	Porcentaje de potencia reflejada	Porcentaje de potencia transmitida
1,0	0,0	100,0
1,1	0,2	99,8
1,2	0,8	99,2
1,5	4,0	96,0
2,0	11,1	88,9
3,0	25,0	75,0
4,0	36,0	64,0
5,0	44,4	55,6
5,83	50,0	50,0
10,0	66,9	33,1
15,0	76,6	23,4
20,0	81,8	18,2

Fuente: elaboración propia.

La potencia reflejada es la porción de potencia incidente que no fue absorbida por la carga. En consecuencia, esta nunca excede a la potencia incidente. Las dos ondas viajeras de potencia incidente y potencia reflejada están presentes en la línea de transmisión todo el tiempo y ambas, en conjunto, establecen un patrón de interferencia conocido como *onda estacionaria*. Para que un sistema de radio (transmisor o receptor) suministre o reciba máxima potencia a/de una antena, la impedancia de salida/entrada del sistema de radio y la de la línea de transmisión debe ser aproximada a la impedancia de la antena. La *vswr* es una medida del desacoplamiento de todas las cargas en el sistema radiante (*feeders*, *jumpers*, conectores, antenas, y otros dispositivos que formen parte del sistema radiante). En términos prácticos: un cable de alimentación o alimentador (*feeder*) golpeado, un conector inadecuado o mal conectado, un empalme de dos secciones de línea mal alineados o un puerto de antena oxidado hacen que la impedancia de la línea de transmisión varíe en toda su longitud, y que la onda reflejada se incremente. Por lo que el valor de *vswr* se elevará.

Cuando el *vswr* es grande, se presentan efectos indeseables en el sistema radiante. Por ejemplo, en aplicaciones de alta potencia se pueden presentar voltajes altos en ciertos puntos de la línea de transmisión y esto genera arcos. También, se pueden presentar variaciones de impedancia en la línea cuando se cambia la frecuencia, lo que llega a afectar la operación del transmisor. Existen dos estrategias para mejorar el valor de *vswr* en un sistema de radio. La primera consiste en adaptar impedancias mediante acopladores (bálunes), los cuales cumplen las funciones de convertir señales desbalanceadas a balanceadas y acoplar impedancias entre la línea de transmisión y la antena. La segunda, se basa en usar atenuadores sobre algún punto específico de la línea de transmisión [11]. Esta última surge de las prácticas de diseño y construcción de sistemas de comunicaciones. En estas prácticas se ha podido constatar que ubicando un atenuador de determinado valor en la entrada del acople del dispositivo se reduce de manera significativa el valor del *vswr*, teniendo como desventaja

la atenuación de potencia de la onda electromagnética transmitida.

La *pérdida de retorno* es el segundo parámetro que se usa para la evaluación de un sistema radiante. También llamado S_{22} en parámetros de dispersión, se define como la relación entre la potencia reflejada a la potencia incidente en la entrada del dispositivo [12]. *RL* se puede expresar en veces o en dB (ecuación 2).

$$RL[dB] = -20 \log_{10} |\Gamma| = -20 \frac{|V_r|}{|V_i|} = -10 \frac{P_r}{P_i} \quad (2)$$

La reflexión por desacoplamiento entre la línea y la carga, la discontinuidad de la línea de transmisión o guía de onda y la mala inserción de un dispositivo a la línea son algunas causas de pérdida de potencia de la señal transmitida. Las pérdidas debidas a este último factor se definen como la relación entre la potencia transmitida (potencia disponible a la salida del puerto) y la potencia incidente a la entrada. Teniendo en cuenta que la potencia transmitida en un dispositivo es igual a la diferencia entre la potencia incidente y la reflejada en un dispositivo con pérdidas, las pérdidas de inserción se determinan con la ecuación 3.

$$IL(dB) = 10 \log_{10}(1 - \Gamma^2) \quad (3)$$

Generalmente, las pérdidas de retorno se muestran en los equipos de medida en una escala comprendida entre 0 dB y -60 dB. En la cual, 0 dB corresponde a una línea con carga en corto circuito o a un circuito abierto, mientras que -60 dB es la condición de máxima transferencia de energía (acople ideal entre la línea y la carga) [13]. En la tabla 3 se muestra la relación entre las pérdidas de retorno (*RL*) con la razón de onda estacionaria de voltaje (*vswr*) y la magnitud del coeficiente de reflexión ($|\Gamma|$). Se prefiere medir *RL* que a *vswr* porque tiene una mejor resolución para valores pequeños de onda reflejada.

Tabla 3. Relación numérica entre RL con VSWR y $| \Gamma |$

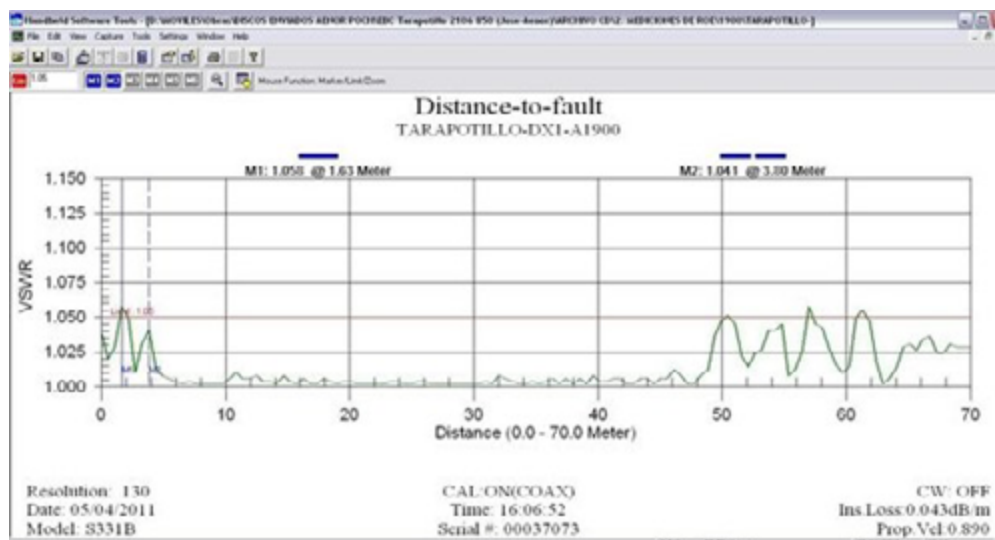
VSWR		
-60	1,002	0,001
-46	1,01	0,005
-26	1,1	0,05
-20	1,2	0,1
-14	1,5	0,2
-9,5	2,0	0,33
-6	3,0	0,5
-3,5	5,0	0,67

Fuente: elaboración propia.

La *distancia a la falla* es el tercer parámetro que se utiliza para evaluar un sistema radiante. El objetivo que se persigue con la medición de este parámetro es evitar que se presenten malas conexiones u otras fallas en el sistema radiante. Es decir, se pretende verificar el cumplimiento de estándares de calidad requeridos. Mediante la transmisión de una señal senoidal en un rango de frecuencias de RF (barrido de frecuencias), desde un generador hacia la antena, se puede identificar el comportamiento del VSWR (modo DTF-VSWR) y RL (modo DTF-RL) en función de la distancia. En la medición de DTF se evalúa la atenuación de la señal en la línea de transmisión (en función de la distancia) desde un extremo de la línea en la que se ubica la fuente de señal hasta el extremo en el que se coloca una carga de 50 Ω (impedancia de entrada de la antena).

El pico máximo de la señal debe estar por debajo de -14 dB para que sea una medida aceptable.

Hay un límite para la medición de la distancia a la falla: la terminación incorrecta o falla, no debe ser sensible a frecuencias periódicas. Por ejemplo, la medición del modo DTF-VSWR puede identificar la distancia a un circuito remoto selectivo (como un sintonizador de antena de acople estándar) que aparece como un cortocircuito o como un circuito abierto en todas las frecuencias. Pero, no lo podrá hacer cuando se quiera localizar la distancia a un filtro pasa bajos. A no ser que la frecuencia de prueba esté por arriba de la frecuencia de corte del filtro [14]. Este modo medirá apropiadamente la distancia a la falla, si esta se muestra como una resistencia pura. No obstante, no lo hará si el mismo punto se muestra como una carga compleja o reactancia pura. Para confirmar que la medición de la falla sea correcta se repite el proceso con dos pruebas o más a diferentes frecuencias. Para la selección de estas, se considera una separación de una octava entre una y la otra. Si las distancias medidas coinciden entonces se tiene certeza de la medición realizada. Como se muestra en la figura 2, la medición del modo DTF-VSWR es una gráfica de VSWR vs distancia en la que se indica los valores relativos que toma la VSWR a lo largo de la línea de transmisión hasta llegar a la antena.


Figura 2. VSWR visto en un rango de frecuencia para un sistema radiante.

Fuente: Anritsu®-Site Master.

En los equipos modernos se utiliza la técnica de medición de reflectometría en el dominio de la frecuencia FDR (*Frequency Domain Reflectometry*), mediante la cual una señal de prueba hace un barrido de frecuencia en el cable, se procesa la información y se pasa al dominio del tiempo mediante la IFFT (Transformada inversa rápida de Fourier) para su visualización [15]. Esta técnica identifica los puntos de degradación de la señal y permite localizar con precisión las fallas bajo condiciones de corto circuito y circuito abierto. Además, es pertinente en el momento de realizar mantenimiento correctivo y preventivo de las líneas de transmisión. Entre otras fallas, la técnica DTF puede mostrar los

efectos de conexiones deficientes, cables dañados o antenas defectuosas (terminación incorrecta).

2. Metodología seguida en el estudio de caso

Para el estudio de caso, se consideró la evaluación del sistema radiante de un eNodeB urbano de Avantel que provee servicios móviles de voz, SMS, despacho o PTT (*Push to Talk*) y datos (aplicaciones empresariales) con tecnología 3G (UMTS) para la ciudad de Envigado en el departamento de Antioquia. En el mapa de la figura 3 se muestra la cobertura de su red celular.

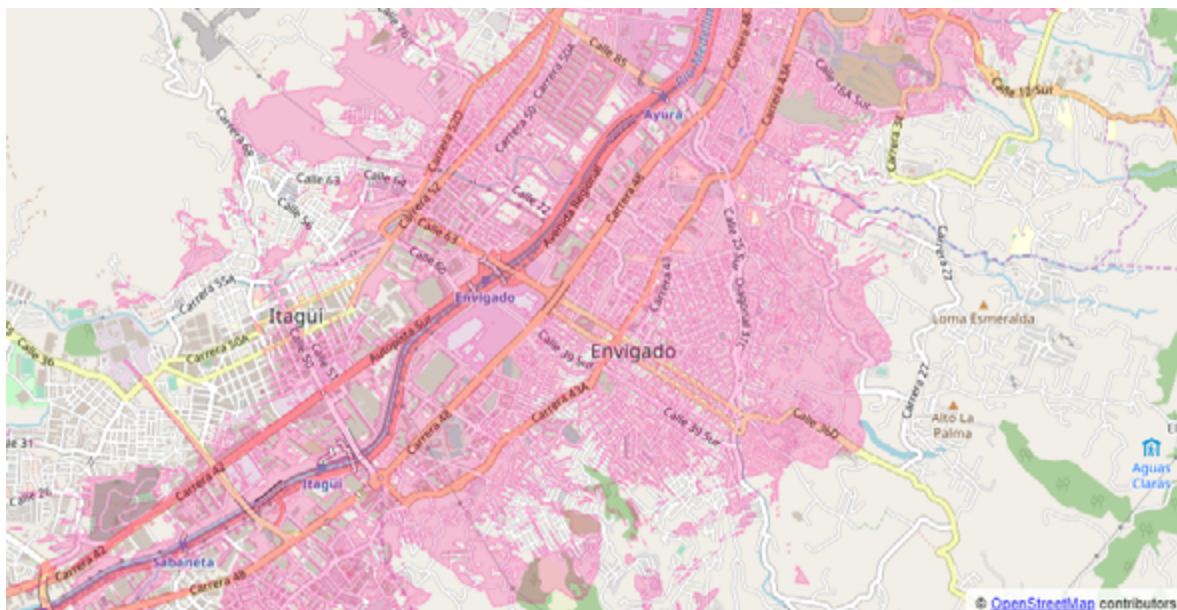


Figura 3. Escenario de mediciones.

Fuente: <https://www.avantel.co/cobertura-calidad>

En entornos urbanos y suburbanos, el sistema radiante debe estar orientado adecuadamente para ofrecer servicio a una determinada área. Utilizando para esta finalidad antenas direccionales. Por este motivo las mediciones de los parámetros

mencionados arriba de un eNodeB, generalmente, se hacen por sectores. El sistema radiante de la estación base urbana se subdividió en tres sectores y contó con antenas Katherien (1 por cada sector) modelo 742223V02. La configuración del sistema

de antenas por cada sector utilizó dos elementos radiantes para recibir (diversidad por espacio, separadas 5 m para aumentar la ganancia directiva del sistema radiante) y uno para transmitir. La diversidad en espacio es una estructura con varias antenas, ampliamente usada en comunicaciones móviles. Se basa en el hecho de que un canal móvil se caracteriza por una respuesta impulsiva aleatoria y variante no solo en el dominio temporal, sino también en el dominio espacial. Los parámetros de ganancia, inclinación de las antenas eléctricas (*electrical downtilt*) y apertura del haz eran similares entre ellas. En la tabla 4, se relacionan algunos modelos de antenas para la banda 4 con sus características.

Como se muestra en la figura 4, cada antena transmisora/receptora sectorial da cobertura a un área equivalente de 120° en acimut. De modo que con tres sectores se cubre los 360° en sentido horizontal.

Tabla 4. Algunos modelos de antenas para la banda 4 de AWS

Modelo de la antena y clase	Banda de frecuencia (MHz)	Enlace de bajada (MHz)	Parámetros
Andrew W2XX-6516DS-vtm, clase A	2.500	2.620-2.650	Polarización: H, G=18, Tilt(°)=10, BW (MHz)=194
Katherien 742223V02, clase A.	1.900	1.930-1.945	Polarización: H, G=17,4, Tilt(°)=4, BW (MHz)=140
Katherien 80010306, clase A.	850	869,04-879,99	Polarización: H, G=17,2, Tilt(°)=5, BW (MHz)=70
Katherien 80010306, clase B.	850	880,02-889,98	Polarización: H, G=17,1, Tilt(°)=9,5, BW (MHz)=70

Fuente: elaboración propia.

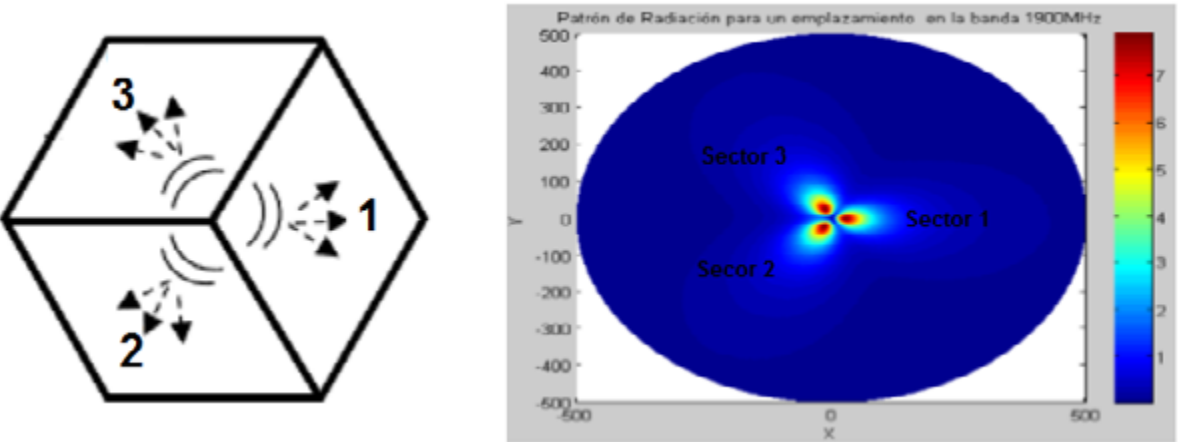


Figura 4. Sectores en los cuales se dividió el emplazamiento para la medición del sistema radiante.

Fuente: elaboración propia.

Inicialmente, se revisó la instalación del sistema radiante. De la revisión, se verificó que todas las conexiones estaban bien terminadas, conectadas y ajustadas; que los cables y conectores no estaban deteriorados o rotos, y que todos los empalmes (*jumpers*) y cables de alimentación (*feeders*) tenían sus respectivas etiquetas y cubrían un radio de cobertura adecuado. Posteriormente, se validó que la instalación cumplía con las recomendaciones del *Site Installation Documentation*. Es decir, acimuts, Tilt eléctrico y mecánico, modelo de antenas, configuración de celda, etc. Por último, se

comprobó que todos los cables estaban conectados a las antenas correctas (prueba de sectorización).

Para las pruebas con el analizador de la línea *Anritsu®-Site Master*, serie S332C, se verificó que las antenas, cables de alimentación y empalmes se encontraran conectados en un recorrido del sistema radiante de principio a fin como lo muestra la figura 5. Adicionalmente, se cotejó que los valores de *vswr* no sobrepasaran el valor de 1,5 ($RL = -14$ dB) en función de la distancia y para la banda de frecuencias de transmisión de 1.710-2.180 MHz.

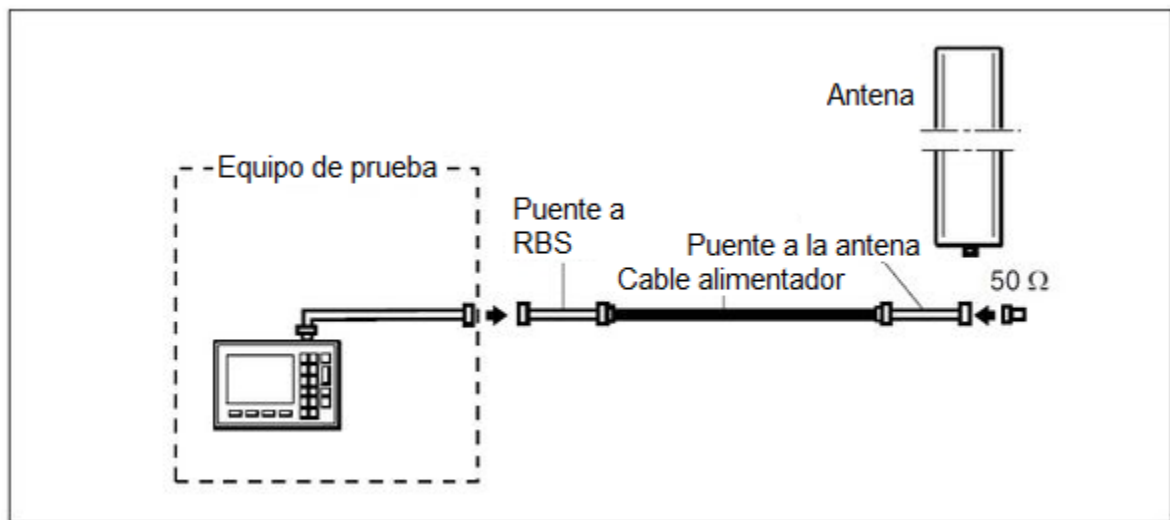


Figura 5. Conexión para las pruebas de sistema radiante pasivo (sin TMA's)

Fuente. http://www.redeweb.com/_txt/639/70.pdf

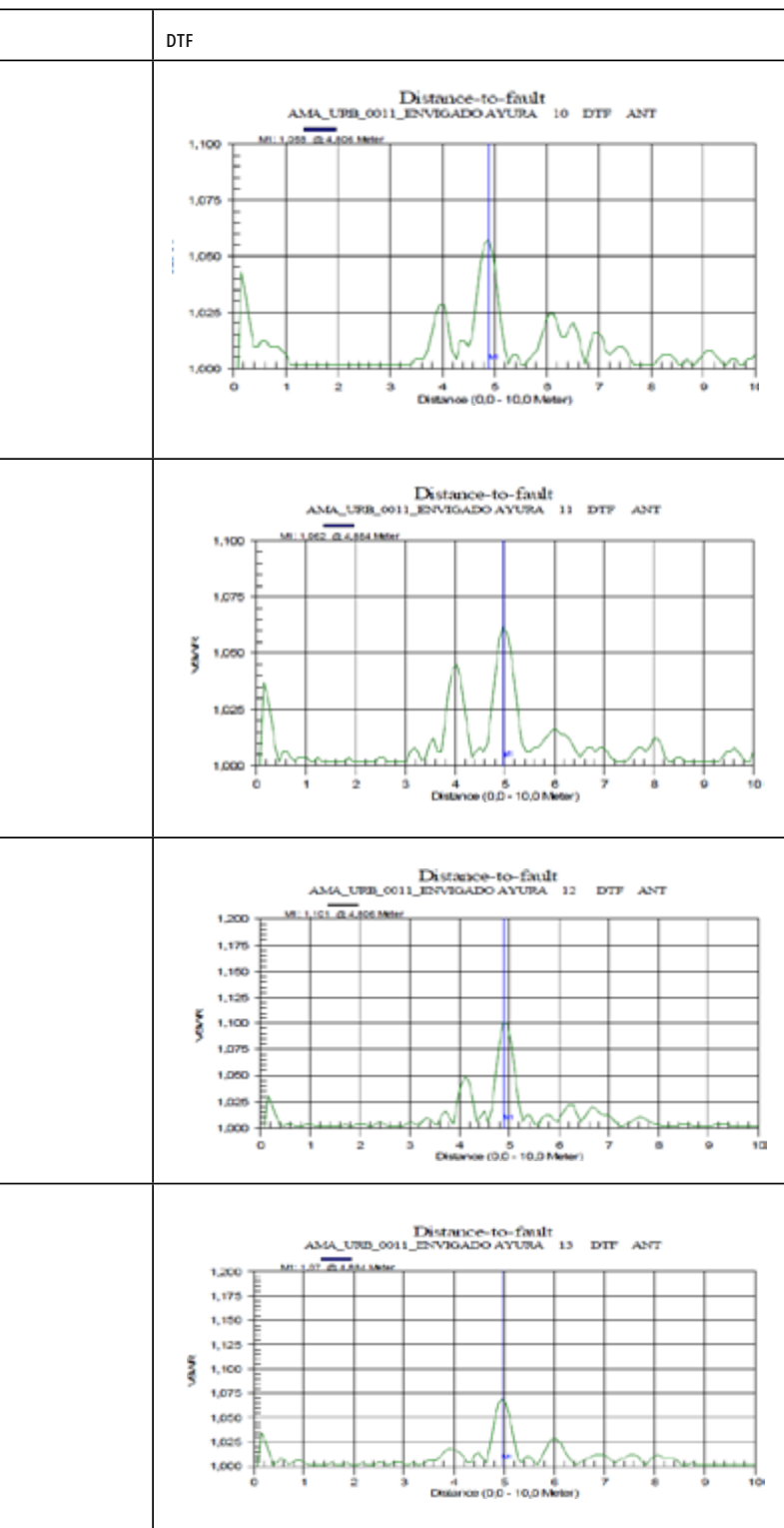
Para medir DTF se tuvo en cuenta los valores del factor de velocidad del cable (0,66 para RG8) y atenuación (dB/m). Para hallar la distancia física se multiplica la distancia eléctrica por el factor de velocidad de propagación (V_p).

3. Resultados

Los resultados de las mediciones de *vswr*, *RL* y DTF del sistema radiante se efectuaron por sectores y subsectores. Lo anterior, debido a que el rendimiento del enlace estaba condicionado por el tipo de antena y el esquema de transmisión/recepción que se usaba en el eNodeB. En las tablas 5 y 6 se muestran los resultados de las mediciones de *vswr*, *RL* y DTF del sistema radiante para el sector 1.

TABLA 5. Comportamiento del VSWR, RL y DTF en la antena del eNodeB para el sector 1 y los subsectores 1,0 al 1,3 en la banda de frecuencias de 1.710-2.180 MHz

	VSWR	RL
1,0	<p>AMA_URB_0011_ENVIGADO AYURA 10 VSWR ANT</p>	<p>Return Loss AMA_URB_0011_ENVIGADO AYURA 10 RL ANT</p>
1,1	<p>AMA_URB_0011_ENVIGADO AYURA 11 VSWR ANT</p>	<p>Return Loss AMA_URB_0011_ENVIGADO AYURA 11 RL ANT</p>
1,2	<p>AMA_URB_0011_ENVIGADO AYURA 12 VSWR ANT</p>	<p>Return Loss AMA_URB_0011_ENVIGADO AYURA 12 RL ANT</p>
1,3	<p>AMA_URB_0011_ENVIGADO AYURA 13 VSWR ANT</p>	<p>Return Loss AMA_URB_0011_ENVIGADO AYURA 13 RL ANT</p>



Fuente: elaboración propia.

TABLA 6. Valores de VSWR, RL y DTF en la antena del eNodeB para los sectores del 1,0 al 1,3, extraídos de la tabla 5.

Subsector	VSWR	VSWR máximo	RL mínimo [dB]	RL promedio [dB]	DTF (VSWR máximo) [m]
1,0	1,09	1,235	-41	-32	4,806
1,1	1,08	1,212	-48	-34	4,884
1,2	1,09	1,215	-41	-31	4,806
1,3	1,1	1,172	-38	-29	4,884
Promedio	1,09	1,233	-42	-31,5	4,845

Fuente: elaboración propia.

Se evaluó la razón de onda estacionaria para el sistema radiante teniendo como referencia $VSWR=1,5$, que es el valor máximo permitido para el operador celular. El valor promedio del $VSWR$ para el subsector 1,0 fue de 1,09, y su valor máximo de 1,235, lo que evidencia una potencia reflejada menor al 1 %. Al comparar $VSWR$ del subsector 1,0 con el subsector 1,1, se identifica mayor varianza en los valores de $VSWR$ que oscilan entre 1,212 y 1,020. A su vez, si se comparan los dos subsectores anteriores con el subsector 1,2, se identifica un incremento leve en el valor promedio del $VSWR=1,2$ para una $f=1.968,68$ MHz. El subsector 1,3 presenta valores disminuidos con respecto a los subsectores anteriores. Dando un valor máximo de 1,172 en la frecuencia de 2.012,4 MHz y un $VSWR$ promedio de 1,1.

El parámetro RL se evaluó para una referencia de $RL=-14$ dB que equivale a una eficiencia de potencia del 96 %. En el subsector 1,0 se observa que ningún valor medido es mayor a -32 dB, lo que significa que se presenta una pérdida de retorno menor a la permitida. En el subsector 1,1, mejoró

RL promedio a -48 dB, lo que implica que es el subsector con menor coeficiente de reflexión: $r=0,05$ y mayor potencia transmitida. En 1,2 sube el valor promedio de RL a -31 dB y también lo hace el RL mínimo. En el subsector 1,3 se evidencia el valor de RL promedio más alto de los cuatro subsectores. Esto sucede a una frecuencia muy cercana a la frecuencia en la cual se presentó el valor máximo de $VSWR$ de este mismo subsector. Además, si se calculan los valores teóricos de RL tomando como referencia las ecuaciones 2 y 1, respectivamente, se obtiene una pérdida de retorno promedio de -27,31 dB, que es un valor mayor al registrado en la tabla VI. Posiblemente, sea debido a la falla detectada en la línea.

Por último, se examinó el DTF y se detectó una falla a una distancia de 5 m del transmisor que coincide para los subsectores 1,0 a 1,3. En ese punto, había una unión entre el alimentador principal y el *jumper* A. Probablemente, una atenuación severa pudo haber sucedido por falta de continuidad. La tabla 7 muestra las mediciones de $VSWR$, RL y DTF del sistema radiante para el sector 2.

TABLA 7. Valores de VSWR, RL y DTF en la antena del eNodeB para los subsectores 2,0 al 2,3

Sector	VSWR	VSWR máximo	RL mínimo [dB]	RL promedio [dB]	DTF (VSWR máximo) [m]
2,0	1,10	1,220	-50	-30	4,884
2,1	1,05	1,186	-50	-39	4,806
2,2	1,20	1,328	-50	-29	4,884
2,3	1,06	1,191	-42	-37	0,078
PROMEDIO	1,10	1,231	-48	-33,75	3,663

Fuente: elaboración propia.

Los valores de la razón de onda estacionaria de los subsectores 2,0 a 2,3, reflejan un aumento de *vswr* promedio con respecto a los sectores registrados en la tabla 6. Sin embargo, el coeficiente de reflexión de 0,05 y el porcentaje de potencia reflejada de 0,2 % son muy bajas. Se evidencian valores de *vswr* máximos de 1,220 a las frecuencias de 2.012,4 MHz y 2.080 MHz en el subsector 2,0; y de 1,328 a la frecuencia de 2.103,5 MHz, en el subsector 2,3.

Las pérdidas de retorno, en las frecuencias de interés, evidencian valores promedios que oscilan

en -33,75 dB. No obstante, también se evidencian *RL* muy bajos de -50 dB a las frecuencias de 1.780 MHz, 1.840 MHz y 1.930 MHz en los subsectores 2,0, 2,1 y 2,2, respectivamente. La distancia a la falla para los subsectores del 2,0 al 2,3 se mantiene en 5 m. Mientras que para el subsector 2,3, la falla se muestra a una distancia muy cercana al origen, de alrededor de 0,078 m. Esto pudo ser ocasionado por la constante dieléctrica del cable en ese punto, lo que afectó a la velocidad de propagación de la onda. La tabla 8 muestra las mediciones de *vswr*, *RL* y *DTF* del sistema radiante para el sector 3.

TABLA 8. Valores de *vswr*, *RL* y *DTF* en la antena del eNodeB para los subsectores del 3,0 al 3,3

Subsector	<i>vswr</i>	<i>vswr</i> máximo	<i>RL</i> mínimo [dB]	<i>RL</i> promedio [dB]	<i>DTF</i> (<i>vswr</i> máximo) [m]
3,0	1,09	1,237	-42	-29	4,806
3,1	1,12	1,262	-48	-32	3,953
3,2	1,12	1,265	-50	-30	4,806
3,3	1,14	1,271	-42	-28	4,961
PROMEDIO	1,12	1,258	-45,5	-29,75	4,632

Fuente: elaboración propia.

Si se comparan los valores promedio de *vswr* medidos en los tres sectores, se obtiene que en el sector 3 se muestra el valor promedio de *vswr*=1,12 más alto. Los valores de *vswr* máximos de 1,26 y 1,27 se presentan a frecuencias altas de 2.016,05 MHz y 1.983,26 MHz. Por su parte, los valores de *RL* para el sector 3 no reflejan mucho cambio en las frecuencias por encima de 1.900 MHz. Sin embargo, se presenta alta varianza de los registros, para los cuatro subsectores, que oscilan entre *RL*=-18 dB para para frecuencias alrededor de 2.034,264 MHz y *rl*=-54 dB para frecuencias próximas de 1.800 MHz.

El resultado de la distancia a la falla en 5 m, del sector 3, es parecido al identificado en el sector 1. Aunque en las gráficas de los subsectores 3,1 y 3,2 se evidencian dos picos a distancias de 4 m y 5 m que se deben tener en cuenta en el análisis. Aun así,

las antenas se ubican cada 5 m. El pico observado a 4 m puede deberse a un error en la precisión con la que se determinó la velocidad de propagación (*V_p*). Ya que esto condiciona la exactitud con la que se localice la distancia de falla o discontinuidad. También, puede ser ocasionada por la presencia de dispositivos como puentes de alimentación (*feed line jumpers*), adaptadores, filtros, dispositivos de protección, duplexores, etc.

4. Análisis de resultados

Con los datos mostrados en la tabla 9, se puede concluir que el sector 1 es el mejor de los tres debido a que cuenta con el menor valor de *vswr*. Por consiguiente, hay un menor índice de reflexión y una menor potencia reflejada. En adición, evidencia una sola falla en la línea de transmisión.

TABLA 9. Resumen de los resultados del sistema radiante para los tres sectores

Sector	VSWR promedio	RL promedio	DTF	Comentario
1	1,09	-31,50	Se detectó una falla a una distancia de 5 m	El mejor subsector fue 1,2
2	1,10	-33,75	Se evidencian dos fallas a distancias de 5 m y 0,078 m	El mejor subsector fue 2,1
3	1,12	-29,75	Se evidencian dos fallas a distancias de 4 m y 5 m	El mejor subsector fue 3,0
Promedio 1, 2 y 3	1,10	-31,67	5 m	=0,05, potencia reflejada 0,2 %, potencia incidente de 99,8 %

Fuente: elaboración propia.

Se recomienda mejorar el sistema radiante frente a las pérdidas de retorno. Ya que, aunque se encuentran con un valor promedio de 31,67, lo que es aceptable, se podría minimizar aún más la potencia de pérdidas.

La variación del VSWR depende de la variación de las ondas viajeras presentes en el sistema radiante, pero, principalmente, de la onda reflejada. En términos prácticos, antenas en mal estado, cables de alimentación golpeados, un conector mal hecho, puerto de antena oxidado o un mal ajuste en el empalme de dos conectores, pérdidas en un acoplador y otros errores en la instalación hacen que la impedancia de la línea de transmisión varíe en toda su longitud. Al mismo tiempo, hará que la onda reflejada se incremente, por lo que el valor de VSWR también aumentará. Otra causa de la variación de VSWR con la longitud de la línea de transmisión es la mala instalación o ubicación de la puesta de tierra de la línea. Esta puede tener alguno de los siguientes problemas:

- La línea está transportando corrientes de modo común y está irradiando (la antena se desintoniza).
- La línea no es de 50 Ω .
- La línea presenta muchas pérdidas.

Ahora bien, puede suceder que la línea de transmisión tiene una impedancia característica de 50 Ω , presenta pérdidas mínimas y está libre de corrientes de modo común. En este caso, VSWR no se

afecta si cambia la longitud de la línea con el consecuente cambio de la reactancia y frecuencia de resonancia. Una antena vertical de $\lambda/4$ alimentada en forma directa puede ser cercana a 2:1 si cuenta con un buen sistema de puesta a tierra VSWR. Cuando la antena no tiene el mismo valor de impedancia que la línea de transmisión, que es lo más común, la longitud de esta modificará la impedancia en el punto de alimentación. Se debe tener en cuenta que si la longitud de la línea de transmisión no es un múltiplo exacto de $\lambda/4$, la frecuencia resonante de la antena puede ser desplazada a una frecuencia mayor o menor debido a la reactancia que agregaría la línea de transmisión al sistema radiante (desintonización de la antena). Lo recomendable es mantener las conexiones lo más cortas posibles cuando se midan componentes o sistemas que no son de 50 Ω .

Conclusiones

Para comprobar el funcionamiento de un sistema radiante se realizan dos tipos de medidas: VSWR y las pérdidas de retorno. Estas indican el nivel de adaptación entre la salida del sistema de radio, la línea de transmisión y el sistema radiante. Con esta información, se puede mejorar las condiciones de diseño y predecir el comportamiento global del sistema, como la caída de nivel de la señal.

La distancia a la falla DTF depende de las medidas obtenidas del VSWR y de las pérdidas de inserción del cable. Si alguna de las medidas no

corresponde se pueden encontrar las causas mediante la determinación de DTF. Esto quiere decir que DTF es la medida que permite ubicar una falla en un sistema de comunicaciones. Mediante barridos de frecuencia y considerando especificaciones técnicas del medio, es posible determinar el origen de la falla localizando discontinuidades. Además, se puede medir la distancia a la que se encuentran respecto a un origen donde esté el equipo de medición.

Las medidas fundamentales, como las pérdidas de retorno, razón de onda estacionaria, pérdidas en el cable, distancia a la falla, son necesarias porque son indispensables para analizar la eficiencia y el rendimiento de una antena. También, se necesitan para localizar y corregir posibles fallas. Por ello, al analizar los resultados podemos concluir que pequeños cambios en el sistema radiante pueden afectar a la señal, área de cobertura y, en algunos casos, originar interrupciones de las llamadas.

Referencias

- [1] X. Liu y D. Gokhale, "An Acquisition Technique for LTE over Satellite", en *MILCOM 2019-2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, Norfolk, VA, USA, nov. 2019, pp. 349-354. Disponible en DOI: 10.1109/MILCOM47813.2019.9020747.
- [2] K. Chi, X. Du, G. Yin *et al.*, (2020 nov.) "Efficient and Fair Wi-Fi and LTE-U Coexistence Via Communications over Content Centric Networking", *Future Gener. Comput. Syst.* [Internet]. Vol. 112, n. ° 5, pp. 297-306. Disponible en DOI: 10.1016/j.future.2020.05.026.
- [3] H. Aichmann, G. Nimtz, y P. Bruney, (2015, dic.) "On the Voltage Standing Wave Ratio of barriers", *Opt. Commun.* [Internet]. Vol. 356, n. ° 2015, pp. 431-434. Disponible en <https://sci-hub.mkxa.top/10.1016/j.optcom.2015.07.089>
- [4] A. M. Miyim y A. Wakili, "Performance Evaluation of LTE Networks", in *2019 15th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*, Abuja, Nigeria, dic. 2019, pp. 1-6. Disponible en <https://sci-hub.se/10.1109/ICECCO48375.2019.9043271>
- [5] A. Bensky, "Radio propagation", in *Short-range Wireless Communication*, Elsevier, 2019, pp. 11-41. Disponible en <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815405-2.00002-6>
- [6] S. J. K. Alarcón, "Diseño a nivel de arquitectura de una red LTE-A para una zona urbana de acuerdo con los estándares 3GPP" tesis de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, 2019. Disponible en <http://www.repositorio.usac.edu.gt/13804/1/Sandy%20Judith%20Kihn%20Alarc%C3%B3n.pdf>
- [7] G. Ibarra-Pastas, *Estudio para mejorar el aumento de la velocidad de datos en una estación móvil con tecnología LTE basado en segunda portadora y carrier aggregation*, Quito: Pontificia universidad católica del Ecuador, 2020. Disponible en http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/18264/IBARRA_GUIDO.Tesis%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [8] S. I. Naqvi, N. Hussain, A. Iqbal *et al.*, (2020, jul. 15). "Integrated lte and Millimeter-Wave 5G mimo Antenna System for 4G/5G Wireless Terminals." *Sensors* [Internet]. Vol. 2020, n. ° 20, 3926-4062. Disponible en <https://doi.org/10.3390/s20143926>
- [9] Z. Xiao-Fang, L. Hua-Zhu, L. Yi *et al.*, (2018, my. 13). "Una matriz de antenas de alimentación de guía de ondas de bajo vswr y alta eficiencia", *Comunicaciones inalámbricas y computación móvil* [Internet]., vol. 2018, pp. 1-7. Disponible en <https://doi.org/10.1155/2018/7867091>
- [10] C.R. Chappidi, T. Sharma y K. Sengupta, (2020, jul.). "Extracción de carga activa multipuerto para amplificadores de potencia 5G de onda mm: ancho de banda, eficiencia de retroceso y tolerancia vswr", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. [Internet]. Vol. 68, n. ° 7, pp. 2998-3016. Disponible en DOI: 10.1109 / TMTT.2020.2977342.
- [11] L. Ghanbari, A. Keshtkar, S. Ghanbari *et al.*, "Antena monopolo plana de vswr baja para comunicación uwv y lte" en 16° Simposio Mediterráneo de Microondas (mms) de 2016, Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos, 2016, pp. 1-4. Disponible en DOI: 10.1109 / MMS.2016.7803832.
- [12] Z. Gan, Z. Tu y Z. Xie, (2018, febr. 27). "Matriz de antena dipolo unidireccional reconfigurable de patrón alimentada por acoplador srw para aplicación de onda milimétrica", *IEEE Access*. [Internet]. Vol. 6, n. ° 2018, pp. 22401-22407, 2018. Disponible en DOI: 10.1109 / ACCESS.2018.2810194.

- [13] S. Ahmadi, "Radio resource control functions", in *LTE-Advanced*, Elsevier, 2014 pp. 227-287. Disponible en <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405162-1.00005-8>
- [14] R. Iglesias, F. Ares, M. Fernández-Delgado *et al.*, "Detección de fallas de elementos en arreglos de antenas lineales usando razonamiento basado en casos", en *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 50, n. ° 4, págs. 198-204, agosto de 2008. Disponible en doi: 10.1109 / MAP.2008.4653709.
- [15] M. Franchet, N. Ravot y O. Picon, "Detección de fallas suaves en cables usando la reflectometría de dominio de tiempo-frecuencia de clúster", en *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 2, n. ° 1, pp. 54-69, 1er trimestre de 2013. Disponible en doi: 10.1109 / MEMC.2013.6512221.